

Relación entre longitud de zancada y velocidad en dinosaurios y atletas.

Javier Ruiz

Departamento de Geodinámica,
Facultad de Ciencias Geológicas,
Universidad Complutense de Madrid,
28040 Madrid, España
jaruiz@eucmax.sim.ucm.es

Resumen

En el marco del debate sobre la capacidad de correr de los dinosaurios, se han llevado a cabo varios intentos de deducir su velocidad de desplazamiento en base a los restos de sus esqueletos, o a los rastros de pisadas fósiles que dejaron. Estos trabajos se fundamentan en observaciones de animales al paso o la carrera, o en analogías sobre el movimiento de sus miembros. El punto central de los modelos es la asunción de que la velocidad de desplazamiento se incrementa con el aumento de la longitud de zancada, pero el análisis de la relación entre velocidad y longitud de zancada en competiciones oficiales de atletismo indica que la situación real no es tan sencilla. Los datos referentes a atletas estudiados en este trabajo parecen disponerse en dos series diferenciadas, que dependen del régimen de velocidad, caracterizadas por una diferente dependencia de la velocidad respecto de la zancada, incluso para una misma longitud de ésta. Por tanto, los estudios sobre la velocidad de desplazamiento en dinosaurios, y por extensión en otros grupos de vertebrados fósiles, deben encararse, al menos, con mucha cautela.

Introducción

Un tema clásico en la Paleontología de vertebrados de las últimas tres décadas lo ha constituido el estudio, con más o menos base, de la velocidad de desplazamiento de los dinosaurios, incluyendo la posibilidad de que estos reptiles arcosaurios tuvieran capacidad para correr (Lockley 1991).

Para abordar esta cuestión se han desarrollado métodos numéricos (Alexander 1976, Demathieu 1984, Demathieu 1986 *vide* Thulborn 1990) que plantearon ecuaciones adecuadas para el cálculo de la velocidad en los dinosaurios en función de la longitud de zancada y la altura de la extremidad. En ellos se asume de manera explícita que a mayor longitud de zancada (definida como la distancia entre puntos homólogos en dos pisadas sucesivas de un mismo pie) la velocidad es mayor, asunción que nunca ha sido cuestionada. Estos trabajos se han basado en la observación del movimiento de mamíferos en libertad, e incluso (Alexander 1976) en experimentos con personas. Alexander (1991) justificó que los mamíferos, pueden considerarse un buen análogo del modo de desplazarse los dinosaurios, en que ambos grupos de vertebrados tienen las extremidades dispuestas debajo del cuerpo, a diferencia de lo que sucede en los reptiles actuales. Según este autor, el hombre no representa ninguna excepción en este sentido, y su manera de mover los miembros es completamente análoga a la del resto de mamíferos.

En este trabajo se compara la relación entre longitud de zancada y velocidad en atletas humanos de ambos sexos, con la finalidad de poner a prueba la asunción básica, la relación directa entre ambos parámetros, que constituye el núcleo de los métodos de cálculo de velocidad de desplazamiento terrestre utilizados hasta ahora. Para ello se utilizan datos de longitud y frecuencia de zancada, y velocidad, obtenidos a partir de pruebas de competiciones oficiales de atletismo, que constituyen potencialmente un excelente material de comparación.

Trabajos previos

En líneas generales, son dos los métodos principales que se han venido usando para estimar la velocidad de los dinosaurios (para una revisión, véase Thulborn 1990), conocidos como el método de Alexander, y el método de Demathieu. Aunque el método de Alexander, o modificaciones del mismo, ha sido el más ampliamente utilizado, los resultados que se derivan, al menos para dinosaurios bípedos, no son muy diferentes que los proporcionados por el método de Demathieu.

Alexander (1976) sugirió que el número de Froude, un parámetro adimensional usado comúnmente en ingeniería náutica, podía ser utilizado para comparar la manera de desplazarse en diferentes animales que se mueven sobre el suelo. En este caso, Alexander (1976) propuso definir el número de Froude como v^2 / gh , donde v es la velocidad de desplazamiento, g la aceleración de la gravedad, y h la altura de la extremidad desde el suelo hasta la articulación de la cadera. A partir de observaciones de diferentes animales (incluyendo un experimento con tres humanos corriendo en una playa) este autor obtuvo la relación

$$\lambda / h \cong 2,3 (v^2 / gh)^{0,3}, \quad (1)$$

donde λ es la longitud de zancada. A partir de la ecuación (1), Alexander obtuvo la velocidad de desplazamiento

$$v \cong 0,25 g^{0,5} \lambda^{1,67} h^{-1,17}; \quad (2)$$

de esta expresión se deduce que la velocidad es mayor cuanto más amplia es la longitud de zancada. Posteriormente, a partir de observaciones de ungulados africanos a la carrera, Alexander *et al.* (1977) propusieron la relación,

$$\lambda / h \cong 1,8 (v^2 / gh)^{0,3}, \quad (3)$$

para animales que se desplazan rápidamente, de la cual se puede despejar v

$$v \cong 0,47 g^{0,5} \lambda^{1,28} h^{-0,78}. \quad (4)$$

A partir de esta expresión se vuelve a tener que a mayor longitud de zancada la velocidad de desplazamiento es más rápida, aunque en este caso el aumento proporcional es menor, pero las velocidades obtenidas son mayores (Farlow 1981), debido al valor menor del exponente de h .

Por su parte, Demathieu (1984), se basó en una analogía del movimiento de las patas traseras de los animales con el de un péndulo con forma de cono invertido, donde la base del cono descansa en la articulación de la cadera, y su vértice se sitúa en la parte de apoyo del pie. Este autor propuso la relación

$$v \cong (1 / 2\pi) \lambda g^{0.5} L^{-0.5}, \quad (5)$$

donde L es la longitud del péndulo simple sincrónico equivalente, definida como

$$L = (3R + 2h) / 5h, \quad (6)$$

donde R representa a su vez el radio máximo del cono, que, debe estimarse en base al estudio de restos esqueléticos de dinosaurios, pero que en la práctica, al no coincidir con ninguna dimensión corporal o esquelética concreta, es un parámetro que debe ser asumido. Demathieu (1984), señala que su método tiene muchas similitudes con el de Alexander, aunque lo considera más sencillo conceptualmente, pero con mayor dificultad de cálculo.

En un trabajo posterior, y siguiendo un enfoque algo diferente, Demathieu (1986 *fide* Thulborn 1990) propuso una relación simple entre velocidad y período de oscilación del péndulo, T , que puede escribirse (ligeramente modificada para obtener el resultado en metros por segundo, si λ se expresa en metros y T en segundos) como

$$v = \lambda / T; \quad (7)$$

donde a su vez T se puede definir (igualmente modificado en el mismo sentido) en la forma

$$T = 1,28451 h^{1/2} (1 + \theta^2 / 16), \quad (8)$$

donde θ representa la mitad del ángulo de paso, parámetro que puede medirse sobre un rastro de varias pisadas. El factor $\theta^2 / 16$ puede en general despreciarse (Demathieu 1984), por lo que la ecuación (7) puede volver a escribirse como

$$v = 0,7785 \lambda / h^{1/2}. \quad (9)$$

Así pues, a partir del método de Demathieu se sigue, independientemente de cual de sus versiones se considere, que la velocidad de desplazamiento es directamente proporcional a la longitud de zancada. Por otra parte, las velocidades obtenidas para ambas versiones son comparables entre sí, aunque los valores derivados del empleo de la versión de 1984 son algo más elevados (Thulborn 1990).

Por tanto, puede comprobarse que ambos métodos consideran que la velocidad a la que se mueven los animales terrestres se incrementa con el aumento de la longitud de zancada. Un parámetro igualmente importante en los dos métodos es la altura total de la extremidad posterior. Se ha realizado bastante trabajo para estimar h a partir de pisadas fósiles, en base a las proporciones relativas entre el pie y la altura de la extremidad en diferentes grupos de dinosaurios, considerando bien la longitud del pie (Thulborn 1982, Thulborn 1984, Sanz *et al.* 1985), o su anchura (Bakker 1987), pero no reviste una importancia crucial en la argumentación realizada en este trabajo, debido al tipo de datos estudiados, y no se va a analizar aquí.

Las estimaciones de velocidades que se derivan a partir de la medida de la longitud de zancada en pistas fósiles son en general bastante bajas, y raramente exceden de 10 km/h, lo que debe considerarse lógico, dado que los animales evitan correr debido al coste energético de esta actividad (Lockley 1991). Las velocidades más altas propuestas corresponden a dinosaurios bípedos, en general terópodos (Thulborn 1990). Para grandes dinosaurios saurópodos las velocidades más elevadas calculadas se encuentran por debajo de 7 km/h (Lockley 1987). Un caso excepcional lo constituye un rastro del Cretácico inferior de Texas, debido a un terópodo, para el que se ha deducido una velocidad de ~ 43 km/h a partir de una longitud de zancada de 5,3 m (Farlow 1981), aplicando el método de Alexander.

Finalmente, Alexander (1976) propuso que un animal pasa de caminar a trotar o correr (el citado autor no diferenció entre estas dos formas de locomoción terrestre) cuando la relación supera un valor de λ / h de 2,0. Posteriormente, se ha considerado que la separación entre los regímenes de trote y carrera viene dada por un valor de λ / h de 2,9 (Thulborn 1990). Al hilo de lo comentado en el párrafo anterior, la mayoría de ejemplos conocidos en el registro fósil corresponden a casos en que $\lambda / h < 2,0$ (Alexander 1976, Thulborn 1990).

Metodología

El objetivo de este trabajo consiste en poner a prueba la hipótesis central de los modelos de Alexander y Demathieu: la relación directa entre longitud de zancada y velocidad de progresión en dinosaurios y mamíferos (incluido el hombre). Si la hipótesis es correcta debe encontrarse que, efectivamente, existe una correlación entre λ y v evidenciada en forma de una función de regresión creciente (como por ejemplo una regresión lineal de pendiente positiva). Si la hipótesis es incorrecta, se debería esperar encontrar una regresión lineal de pendiente negativa o próxima a cero, o bien una regresión polinómica que presente uno o más máximos.

Para llevar a cabo dicho objetivo, se va a realizar la representación gráfica de la velocidad de carrera, v (en metros por segundo), en función de la longitud de zancada, λ (dada en metros), en atletas, tanto masculinos como femeninos, de 100 y 400 metros, y en un atleta masculino junior de 1500 metros, a partir de datos obtenidos mediante filmaciones de competiciones oficiales de atletismo. También se va a representar la frecuencia de zancada (número de zancadas por segundo) en función de la longitud de zancada, para el conjunto total de datos de λ considerados en este trabajo. Para ello se deben realizar algunas precisiones.

En paleoicnología se define la longitud de zancada como la distancia entre puntos homólogos en dos icnitas sucesivas dejadas por un mismo autópodo, y como se ha visto en la sección anterior, este es el parámetro que se utiliza en las ecuaciones para estimar la velocidad de desplazamiento del animal. En los análisis de carreras en atletismo se presentan los datos como amplitud de paso, que en términos paleoicnológicos se definiría como longitud de paso en proyección, o distancia entre puntos homólogos en dos pisadas consecutivas de pies alternos, proyectada en una dirección paralela al eje de progresión de la pista (Moratalla *et al.* 1988). Nótese que ahora en lugar de huellas se habla de pisadas, pero para la finalidad de este trabajo el concepto es totalmente equivalente. Si la amplitud de paso se denota por l , la longitud de zancada se obtiene a partir de los datos de competiciones de atletismo utilizando la conversión $\lambda = 2 l$. Por tanto, la frecuencia de paso (número de pasos por segundo), que se puede simbolizar por f_p , puede convertirse en frecuencia de zancada según $f_z = f_p / 2$.

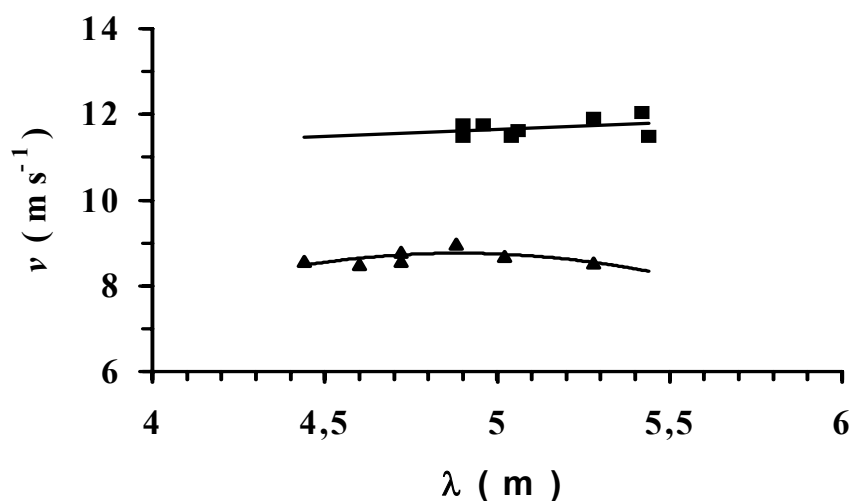


Figura 1. Velocidad de desplazamiento en función de la longitud de zancada para atletas masculinos de 100 metros (cuadrados rellenos) y 400 metros (triángulos rellenos). Para una explicación más detallada véase el texto.

Resultados

En la Figura 1 se muestra la relación entre v y λ en corredores masculinos de 100 y 400 metros. En el caso de los 100 metros se representan los valores medios de ambos parámetros en el intervalo de carrera entre 70 y 80 metros, para los ocho atletas finalistas de los Campeonatos del Mundo de Tokio de 1991 (Ae *et al.* 1992); en ese intervalo alcanzaron su máxima velocidad la mayoría de los participantes en esa prueba. Para los 400 metros se representan gráficamente los valores medios de v y λ en el intervalo entre 328 y 333 metros para siete

atletas en la final de 4 x 400 metros de los Campeonatos del Mundo de Helsinki de 1983 (Mero *et al.* 1988). En la Figura 1 no se observa una clara correlación entre v y λ . La regresión lineal que ajusta los datos de 100 metros es descrita por la ecuación

$$v = 0,3265 \lambda + 10,02, \quad (10)$$

y tiene asociado un coeficiente de correlación $R^2 = 0,12$; la correlación no mejora si se usan otros tipos de curvas de regresión. A su vez, el mejor ajuste de los datos de 400 metros se obtiene con la ecuación polinómica de segundo grado

$$v = -1,389 \lambda^2 + 13,58 \lambda - 24,43, \quad (11)$$

con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,40$. Mientras que para los corredores de 100 metros se observa un cierto aumento de v en relación con el incremento de λ , en 400 metros el carácter de ecuación de segundo grado de (11), junto con la forma de la función que describe, implica que, siendo $a = -1,389 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y $b = 13,58 \text{ s}^{-1}$, v presenta un máximo para

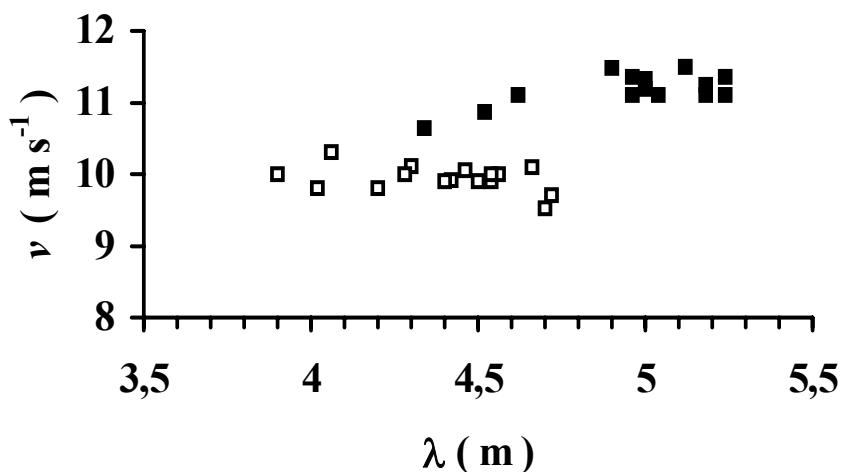


Figura 2. Velocidad de desplazamiento en función de la longitud de zancada para atletas masculinos (cuadrados rellenos) y femeninos (cuadrados huecos) de 100 metros. En el texto se puede encontrar una explicación más detallada.

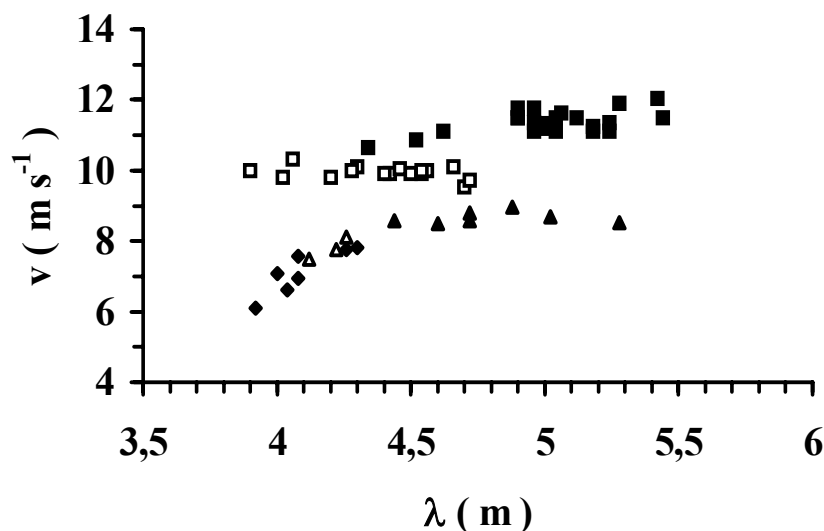
$$\lambda_* = -b / 2a = -13,58 / 2(-1,389) = 4,89 \text{ m}. \quad (12)$$

Por otra parte, en ambos casos se observa una pobre correlación entre los datos que conforman las curvas de regresión.

También se puede comprobar en la Figura 1 que, aunque la velocidad de los corredores de 100 metros es alrededor de un 30 por cien más elevada, y existe una clara separación de las dos series de datos en el gráfico, el rango de valores de λ se solapa entre ambos grupos de corredores de una manera amplia. Como la velocidad de progresión puede definirse como $v = \lambda f_z$, queda claro que si para una misma longitud de zancada se tienen diferentes velocidades, ello implica en correspondencia distintos valores de f_z . La frecuencia de zancada es un factor extremadamente difícil (si no imposible) de determinar sobre un esqueleto o un rastro fósil, y no se ha tenido en cuenta hasta ahora en los modelos.

En la Figura 2 se representan valores de v en función de λ medidos en las pruebas masculina y femenina de 100 metros de la Copa del Mundo de Barcelona de 1989 (Pascua 1990). Se han representado datos promediados cada veinte metros de cuatro atletas en cada caso, incluyendo los tres primeros corredores de cada prueba. Los datos correspondientes a los 20 primeros metros no se han tenido en consideración, ya que los atletas comenzaron a correr partiendo agachados en tacos de salida, con lo que los primeros pasos son más cortos

de lo normal (Pascua 1990). Aunque tanto para hombres como para mujeres se observa que la dependencia de v respecto de λ no es muy clara (incluso para mujeres parece que la velocidad baja con el aumento de la zancada), puede aún argumentarse que en 100 metros, cuando se toman los datos de ambos sexos conjuntamente, existe una tendencia al aumento de velocidad con respecto al incremento de la longitud de zancada. La curva de



regresión para estos datos, junto con **Figura 3**. Velocidad de desplazamiento en función de la longitud de zancada para atletas de 100 metros masculinos (cuadrados rellenos) y femeninos (cuadrados huecos), atletas de 400 metros masculinos (triángulos rellenos) y femeninos (triángulos huecos), y un atleta masculino junior de 1500 metros (rombos rellenos). Véase el texto.

los de 100 metros de la Figura 1, se muestra en la Figura 4, y se comenta más adelante.

En la Figura 3 se han representado de manera gráfica todos los datos de v y λ considerados en las Figuras 1 y 2, además de tres datos adicionales de atletas femeninos en el intervalo entre 328 y 333 metros de la final de 4 x 400 metros del Campeonato del Mundo de Helsinki de 1983 (Mero *et al.* 1988), y los correspondientes a diversos intervalos de la carrera del vencedor de la final de 1500 metros en el Campeonato del Mundo Junior de 1986 (Ballesteros 1990). En la Figura 4 se muestra la línea recta de regresión que ajusta la totalidad de los datos representados en la Figura 3, y que responde a la ecuación

$$v = 2,543 \lambda - 1,94, \quad (13)$$

con un correspondiente coeficiente de correlación $R^2 = 0,49$, que no resulta mejor si se usan otros tipos de regresión. Alternativamente, los datos representados en las Figuras 3 y 4 pueden agruparse en dos series distintas. Una serie correspondería al régimen de velocidad máxima, incorpora los datos de 100 metros, tanto femeninos como masculinos, y su mejor ajuste es por medio de la ecuación

$$v = 0,61 \lambda^2 - 4,217 \lambda + 16,93, \quad (14)$$

con $R^2 = 0,66$; conjuntamente, el hecho de tratarse de ecuación de segundo grado y la forma de la curva implican que v presenta un mínimo, para una longitud de zancada de

$$\lambda_0 = -(-4,217) / 2(0,61) = 3,46 \text{ m}. \quad (15)$$

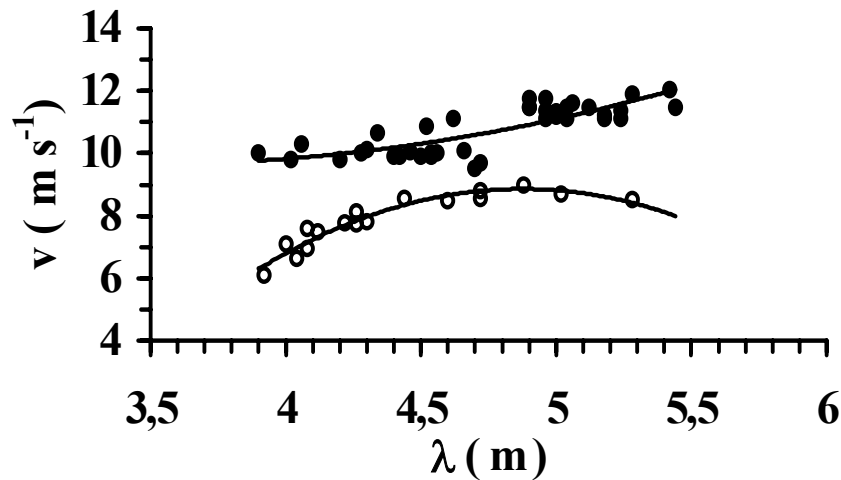


Figura 4. Velocidad de desplazamiento en función de la longitud de zancada para atletas de 100 metros (círculos rellenos) y atletas de 400 y 1500 metros (círculos huecos). En esta Figura no se tiene en cuenta el sexo. Se muestran las curvas de regresión que ajustan dos posibles regímenes diferentes de v en función de λ (líneas continuas), y la recta de regresión que ajusta la totalidad de los datos (línea a trazos).

Como este valor crítico de λ se encuentra por debajo del intervalo cubierto por los datos, para esta serie se cumple el aumento de v con el incremento de λ dentro del rango de valores considerado. La otra serie de datos comprende el resto de los representados en la Figura 3 (correspondería a lo que se podría llamar régimen de alta velocidad sostenida), y encuentra el mejor ajuste en la ecuación de segundo grado

$$v = -2,697 \lambda^2 + 26,295 \lambda - 55,23, \quad (16)$$

con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,92$; la función descrita por (16) presenta un máximo, que se correspondería con una longitud de zancada de

$$\lambda_* = -26,295 / 2(-2,697) = 4,87 \text{ m}, \quad (17)$$

valor que es casi igual al obtenido para los datos de 400 metros masculinos; por encima de este valor óptimo, v disminuye con el incremento de λ . Ambas series de datos se extienden por un intervalo de longitudes de zancada prácticamente equivalente.

Por último, en la Figura 5 se muestra f_z en función de λ , para todos los datos de λ manejados hasta ahora. En la representación gráfica se sigue apreciando la presencia de dos series separadas de datos, pero en la serie correspondiente al régimen de alta velocidad (para carreras de 100 metros), puede quizá evidenciarse una diferente tendencia en los puntos correspondientes a hombres y mujeres, como sucedía en el caso de la relación entre v y λ (Figuras 2 y 3), pero como entonces, puede todavía argumentarse que, tomados en conjunto, los datos de 100 metros de ambos sexos

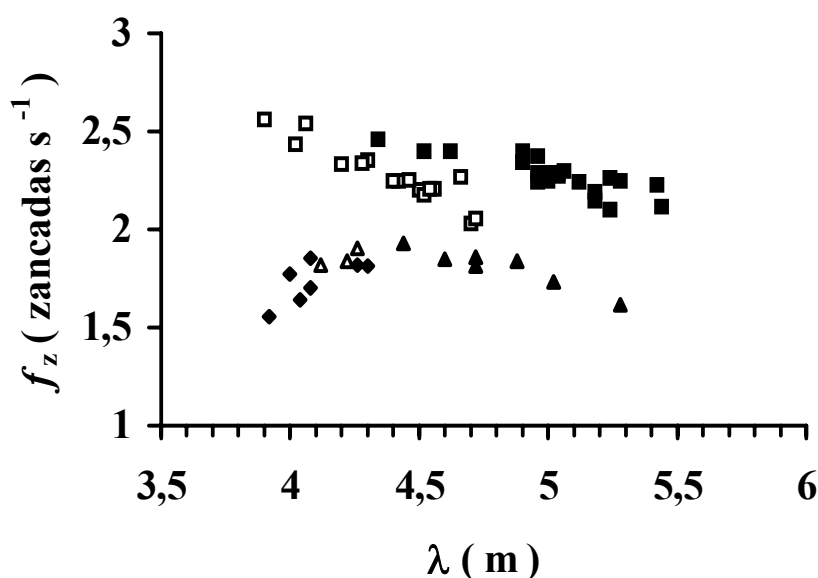


Figura 5. Frecuencia de zancada en función de la longitud de zancada para el mismo conjunto de atletas de la Figura 3. Los símbolos también son los mismos de la Figura 3.

muestran una tendencia común consistente. De cualquier forma, la utilidad de esta figura radica fundamentalmente en llamar la atención sobre el riesgo de una excesiva simplificación, y por ello, en aras de la claridad, se ha optado por no presentar las curvas de tendencia, o las ecuaciones que las describen.

Discusión

Si se toman en consideración de manera conjunta todos los datos de v en función de λ utilizados en este trabajo, se puede comprobar que es posible ajustarlos con un aumento de la velocidad de carrera con el alargamiento de la zancada, como es predicho por los modelos de Alexander y Demathieu (en el método de Alexander la relación no es estrictamente lineal, como puede deducirse de las ecuaciones (2) y (4), pero si, según las ecuaciones (5) y (9), en el método de Demathieu). Pero el coeficiente de correlación asociado a la regresión lineal que describe dicho aumento, 0,49, no es muy significativo, suponiendo que solamente alrededor de la mitad de la variación observada puede ser explicada por la tendencia lineal.

Por otra parte, la posible estructuración de los datos de velocidad de desplazamiento en función de la longitud de zancada en atletas humanos en dos series diferentes, resulta muy llamativa, pues parece producirse en prácticamente todo el intervalo de λ para el que se presentan datos. Debe tenerse en cuenta la posibilidad de que tal separación en dos series sea en realidad un artificio debido a la falta de datos de otras distancias. En este caso, el aporte de tales datos debería llenar la "brecha" entre ambas series, quedando de manifiesto una tendencia única. Pero los coeficientes de correlación para cada una de las dos series por separado tienen un valor mayor que el correspondiente a la tendencia lineal para el conjunto de datos, y en este sentido es especialmente relevante el valor $R^2 = 0,92$ para la regresión del régimen de alta velocidad sostenida, que resulta muy difícil de justificar si carece de significación real.

Aunque se trataría en ambos casos de progresión a la carrera en lugar de marcha (esta última era la manera de moverse habitual de los dinosaurios), la posible existencia de dos regímenes separados para una misma λ se encuentra en clara contradicción con la propuesta básica de los modelos que pretenden dar estimaciones cuantitativas de la velocidad de los dinosaurios, la relación proporcional entre λ y v (Alexander 1976, Demathieu 1984, Demathieu 1986 *fide* Thulborn 1990). Incluso hay indicaciones, en la forma de ciertas diferencias en las tendencias de los datos de atletas masculinos y femeninos de 100 metros (Figuras 2, 3 y 5), de que la situación podría ser aún más compleja, aunque en este caso la evidencia es menos firme, y debe ser considerada con precaución.

Aún más, con independencia de la existencia de uno o dos regímenes de carrera, una misma longitud de zancada en distintos atletas puede corresponder a velocidades que se diferencian entre sí incluso en 3 o 4 m s⁻¹ (véase las Figuras 1, 3 y 4), lo que puede traducirse con facilidad en una discrepancia en torno a 10-14 km/h, en absoluto desdeñable cuando se trata con un rango de velocidades de aproximadamente 6-12 m s⁻¹ (~22-43 km/h).

En resumen, los datos de análisis de competiciones de atletismo estudiados en este trabajo no apoyan la hipótesis de la existencia de una relación directa entre λ y v , que es básica en los métodos de Alexander y Demathieu. Aunque se puede trazar una recta de regresión de pendiente creciente para v en función de λ para la totalidad de los datos, y cabe la posibilidad de que la separación en dos series sea producto de un sesgo en las observaciones, los coeficientes de correlación de ambas series tienen valores claramente más altos que los de la recta única, lo que resulta difícil de justificar si constituyen un artificio. De ello se deduce que la propuesta por Alexander y Demathieu no es válida en atletas humanos para el rango de valores de λ y v considerado. Aunque los datos mencionados son contrarios a dicha hipótesis, también es cierto que no bastan para descartarla, pues provienen de personas entrenadas, y es posible que siga siendo válida para valores menores de velocidad.

Por tanto, de todo ello se desprende que ecuaciones como las de los métodos de Alexander y Demathieu deben emplearse con mucha cautela. En consecuencia, para proponer estimas de velocidad absoluta en dinosaurios, o en cualquier otro grupo de vertebrados terrestres fósiles, se debería empezar por determinar la posible existencia de diferentes regímenes de velocidad, incluso dentro de lo que sería la propia marcha. Este empeño parece entrañar una considerable dificultad partiendo de la base de restos esqueléticos o huellas de pisadas, pero quizá podría abordarse su estudio partiendo de mamíferos actuales.

Otra consecuencia, derivada del estudio de carreras de competiciones oficiales de atletismo, es que el uso de valores umbrales de λ / h para separar las actividades de caminar, trotar y correr, resulta un procedimiento, cuando menos, muy discutible, al menos en animales bípedos.

Finalmente, se debe hacer notar que una seria limitación del análisis realizado en este trabajo, la constituye la ausencia de datos correspondientes a carreras de fondo y marcha; esta carencia cobra más importancia dado que la mayoría de pistas de huellas de dinosaurios muestran animales marchando, no corriendo (Alexander 1976, Lockley 1991). Igualmente, información relativa a proporciones corporales de atletas sería de gran utilidad, puesto que otro factor central en los métodos de Alexander y Demathieu es la altura total de la extremidad posterior.

Conclusiones

La principal conclusión que puede deducirse a partir de todo lo anteriormente considerado es que los estudios que tratan de deducir la capacidad de correr (o de desplazarse sobre la tierra en general), a partir de rastros fósiles o de restos esqueléticos, adolecen de una excesiva simplificación. La causa de ello quizá radique (al menos en parte) en las condiciones en las que se estudia el movimiento de animales salvajes, y en este sentido los análisis de competiciones de atletismo ofrecen un material de comparación muy fiable, ya que la recogida de datos se lleva a cabo en condiciones controladas.

La hipótesis básica de que, para unas proporciones corporales dadas, una determinada longitud de zancada determina una correspondiente velocidad de desplazamiento, se encuentra en contradicción con la disposición de los datos referentes a atletas humanos en, al menos, dos series diferentes, la realidad de las cuales parece apoyada por el valor de los coeficientes de correlación. El aumento de v con el incremento de λ parece verificarse para el régimen de máxima velocidad (dentro del intervalo de valores de λ cubierto por los datos), pero en el régimen de alta velocidad sostenida v presenta un máximo para un determinado valor de λ , y disminuye por encima o por debajo de aquel.

Pero los datos manejados en este trabajo no bastan para descartar completamente la mencionada hipótesis de una relación directa entre v y λ , sobre todo para valores de la velocidad menores que los tratados aquí. Por tanto, una ampliación de la base de datos utilizada en este estudio, incorporando además información relativa a medidas antropométricas, debería redundar en un mejor conocimiento de la relación de la velocidad con otros parámetros, tales como λ , h y f_z , en dinosaurios y otros grupos de vertebrados fósiles terrestres.

Agradecimientos. Este trabajo se realizó en el marco de la asignatura Paleozoología de Vertebrados, de la licenciatura de Ciencias Geológicas, obteniendo la calificación de Matrícula de Honor. El autor desea agradecer a los miembros de la Escuela Nacional de Entrenadores de la Real Federación Española de Atletismo, y en especial a Arturo Oliver y Jesús Aranaz, las facilidades prestadas en la búsqueda de datos sobre análisis de competiciones oficiales de atletismo. Igualmente desea expresar su agradecimiento a Nieves López, del Departamento de Paleontología de la Universidad Complutense de Madrid, bajo cuya dirección se llevó a cabo este trabajo.

Bibliografía

- Ae, M., Ito, A., y Suzuki, M., 1992. The men's 100 metres. *New studies in Athletics* **7**, 47-52.
- Alexander, R. McN., 1976. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature* **261**, 129-130.
- Alexander, R. McN., 1991. How dinosaurs ran. *Scientific American* **261**, 130-136. [Traducción española: Dinosaurios a la carrera, *Investigación y Ciencia* **177**, 74-81, 1991].
- Alexander, R. McN., Langman, V. A., y Jayes, A. S., 1977. Fast locomotion of some large African ungulates. *Journal of Zoology* **183**, 291-300.
- Bakker, R. T., 1987. The return of the dancing dinosaurs. En *Dinosaurs Past and Present*, Volumen I (editado por Czerkas, S. J., y Olson, E. C.), pp 38-69, Natural History Museum of Los Angeles County, Los Angeles.
- Ballesteros, J. M., 1990. Carreras de medio fondo y fondo. En *Atletismo (I). Carreras y marcha* (editado por Bravo, J.), pp 79-176, Comité Olímpico Español, Madrid.
- Demathieu, G., 1984. Utilisation de lois de la mécanique pour l'estimation de la vitesse de locomotion des vertébrés tétrapodes du passé. *Geobios* **17**, 439-446.
- Demathieu, G., 1986. Nouvelles recherches sur le vitesse des vertébrés, auteurs de traces fossiles. *Geobios* **19**, 327-333.
- Farlow, J. O., 1981. Estimates of dinosaur speeds from a new trackway site in Texas. *Nature* **294**, 747-748.
- Lockley, M. G., 1987. Dinosaur trackways. En *Dinosaurs Past and Present*, Volumen I (editado por Czerkas, S. J., y Olson, E. C.), pp 80-95, Natural History Museum of Los Angeles County, Los Angeles.
- Lockley, M. G., 1991. Tracking dinosaurs. Cambridge University Press. [Traducción española: Siguiendo las huellas de los dinosaurios, McGraw-Hill, Madrid, 307pp., 1993].
- Mero, A., Luhtanen, P., Komi, P., y Susanka, P., 1988. Kinematics of top sprint (400m) running in fatigued conditions. *Track and Field Quarterly* **88**, 42-45.
- Moratalla, J., Sanz, J. L., Domínguez, I., y Jiménez, S., 1988. Yacimientos paleoicnológicos de La Rioja (Huellas de dinosaurio). Gobierno de La Rioja e Iberduero, 95pp.
- Pascua, M., 1990. Carreras de velocidad. En *Atletismo (I). Carreras y marcha* (editado por Bravo, J.), pp 25-78, Comité Olímpico Español, Madrid.
- Sanz, J. L., Moratalla, J. J. y Casanovas, M. L., 1985. Traza icnológica de un dinosaurio Iguanodóntido en el Cretácico inferior de Cornago (La Rioja, España). *Estudios Geológicos* **41**, 85-91.
- Thulborn, R. A., 1982. Speeds and gaits of dinosaurs. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Paleocology* **38**, 227-256.
- Thulborn, R. A., 1984. Preferred gaits of bipedal dinosaurs. *Alcheringa* **8**, 243-252.
- Thulborn, R. A., 1990. Dinosaurs tracks. Chapman and Hall, London, 410pp.